

700 mJ 紧凑型激光二极管抽运 Nd:YAG 主振荡功率放大系统

董剑¹, 刘学胜¹, 司汉英², 彭超¹, 曹明真¹, 何欢¹, 刘友强¹, 王智勇¹

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124;

²中国电子科技集团第五十三研究所, 天津 300000

摘要 报道了一种紧凑型激光二极管(LD)侧面抽运的高能量全固态 Nd:YAG 主振荡功率放大系统。放大系统整体采用半导体制冷器进行冷却, 实现了激光系统的紧凑化和小型化。主振荡器使用了直径为 7 mm、长度为 100 mm、掺杂浓度(原子数分数)为 1.1% 的 Nd:YAG 晶体棒, 在 10 Hz 重复频率下获得最大脉冲能量为 350 mJ、脉宽为 9.7 ns 的激光输出。功率放大级使用直径为 7.5 mm、长度为 134 mm、掺杂浓度为 1.1% 的 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质, 放大后得到了能量为 700 mJ、脉宽为 10 ns 的激光输出。

关键词 激光器; 全固态激光器; 高能量; 半导体制冷器; 激光二极管抽运; 主振荡功率放大

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0501004

700 mJ Compact Nd:YAG Master-Oscillator Power Amplification System Pumped by Laser Diode

Dong Jian¹, Liu Xuesheng¹, Si Hanying², Peng Chao¹, Cao Mingzhen¹,
He Huan¹, Liu Youqiang¹, Wang Zhiyong¹

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²The 53rd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300000, China

Abstract A compact high-energy solid-state Nd:YAG master-oscillator power amplification system side-pumped by laser diode is presented. We use the thermoelectric cooler in the whole system, and a compact and miniaturized laser system is achieved. A Nd:YAG crystal rod with diameter of 7 mm, length of 100 mm and doping concentration (atomic number fraction) of 1.1% is used in the master oscillator. We obtain a laser pulse with maximum pulse energy of 350 mJ, pulse width of 9.7 ns under repetition rate of 10 Hz. A Nd:YAG crystal rod with diameter of 7.5 mm, length of 134 mm and doping concentration of 1.1% is used as gain medium in power amplification stage. Finally, we obtain the laser pulse with energy of 700 mJ and pulse width of 10 ns.

Key words lasers; solid-state laser; high energy; thermoelectric cooler; laser diode-pumping; master-oscillator power amplification

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3530

1 引言

随着高功率巴条的价格逐渐走低^[1-2]以及半导

体激光工艺的逐渐成熟,激光二极管(LD)抽运的全固态激光器在近几年发展迅猛,正在逐渐取代闪光灯抽运的固体激光器^[3]。采用 LD 抽运的全固态激

收稿日期: 2017-09-29; 收到修改稿日期: 2017-11-22

基金项目: 北京市教委面上项目(KM201310005019)

作者简介: 董剑(1990—),男,硕士研究生,主要从事大功率半导体抽运的全固态激光器方面的研究。

E-mail: dj759759759@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 刘学胜(1980—),男,博士,讲师,主要从事大功率半导体抽运的全固态激光器方面的研究。

E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn(通信联系人)

光器具有高转换效率、高稳定性、结构紧凑等诸多优点,是一种电激励激光器,使用成本和维护的复杂性低^[4-6],因此高能量全固态激光器在材料加工、光通信、倍频转换、光学图像处理、光谱分析、空间通信等领域得到了广泛应用^[7-15]。传统的全固态激光器大多使用水冷却,且输出能量越高的全固态激光器,冷却结构越复杂,庞大的水冷箱使得全固态激光器不便于携带和运输,限制了全固态激光器的应用。采用半导体制冷器(TEC)可以减小激光器体积,解决了水冷却高能量全固态激光器运输不便的问题。2005年,Ostermeyer等^[16]通过主振荡功率放大的方式实现了最大输出能量为0.5 J、脉宽为33 ns的1064 nm激光输出。在重复频率为100 Hz、输出能量为405 mJ的条件下,光束质量 $M^2 = 1.5$;在重复频率为250 Hz、输出能量为402 mJ的条件下, $M^2 = 2.1$ 。2009年,陈薪羽等^[17]将Nd:YAG晶体使用钎焊的方法焊接在半圆形金属热沉上进行散热,得到了重复频率为20 Hz、最大输出能量为151 mJ、脉宽为8.48 ns的激光输出,光-光转换效率达到了12.6%。2013年,Bezyazychnaya等^[18]在Nd:YAG晶体棒外端安装蓝宝石导管进行散热,使用了3组LD模块进行侧面抽运,并且采用反射聚焦腔提高整体效率的方式,得到了重复频率为30 Hz、单脉冲输出能量在188~210 mJ范围内的激光输出。2014年,Coyle等^[19]基于Nd:YAG全固态激光器制作了一台高效的星载遥感设备,激光器的输出能量为100 mJ、重复频率为100 Hz。Ryabtsev等^[20]采用振荡结合放大的形式和风冷却的方法制作了一台激光雷达,在重复频率为10 Hz的条件下获得了400 mJ的激光输出,脉宽范围为8~11 ns;将此激光雷达作为太空探测雷达,其有效探测距离达到了40 km。

目前,关于高能量无水冷却全固态激光器的报道较少。本文介绍了一种实现LD抽运的高能量、窄脉宽、TEC制冷的全固态激光器的有效方法。实验采用紧凑型主振荡功率放大结构,主振荡级是一台LD侧面抽运的电光调Q激光器。将直径为7 mm、长度为100 mm、掺杂浓度为1.1%的Nd:YAG晶体棒作为增益介质,将峰值功率为15 kW的LD阵列作为抽运源,总腔长为280 mm,得到输出激光的最大能量为350 mJ,脉宽为9.7 ns,重复频率为10 Hz,在 x 、 y 两个方向上的光束质量分别为7.7和12.3。放大级使用直径为7.5 mm、长度为134 mm、掺杂浓度为1.1%的Nd:YAG的晶体棒和峰值功率为24 kW的LD阵

列集成的LD模块。经放大后,得到了输出能量为700 mJ、脉宽为10 ns的激光输出,在 x 、 y 两个方向上的光束质量分别为7.5和12.4。

2 实验装置与实验结果

2.1 主振荡级

主振荡级是一台LD侧面抽运的电光调Q激光器,实验装置如图1所示。实验使用Nd:YAG作为增益介质,晶体棒的直径为7 mm、长度为100 mm,掺杂浓度为 $1.1\% \pm 0.001$ 。使用中心波长为808 nm、谱线宽度小于3 nm的LD阵列作为抽运源,以使其与Nd:YAG晶体的吸收峰相匹配。将晶体棒和LD阵列集成为一个LD模块,以提高系统稳定性并减小激光器体积。为了有效利用激活材料并增大模的体积,实验选用平-平腔结构。在包含激光晶体的有源腔中,由于热致热透镜效应,激光腔中的晶体棒等效为一个凸透镜,平-平腔结构成为一种损耗小的稳定腔^[21-22]。激光器采用侧面LD对称抽运的方式,这种抽运方式能在固体增益介质中实现抽运光的均匀分布,抽运光的能量中心也与晶体中心重合,大大提高了抽运光的利用率和基横模的转化效率,从而有利于实现大能量、高光束质量的激光输出。LD模块的横截面如图2所示。晶体棒由铜夹具夹持,位于整个模块中心,晶体棒周围是由30个巴条组成的LD阵列,每个巴条输出的最大峰值功率为100 W,将LD阵列直接焊接在铜热沉上进行散热。整个模块由5个相似的抽运部件组成,并采用交替抽运散热的结构,如图3所示,每个抽运部件都含有一个LD阵列,将所有LD阵列串联在一起并接入外电路。LD模块的实物图如图4所示。LD阵列的最大工作电流为120 A,最大工作脉宽为250 μs 。在LD模块的下端,用导热硅脂黏附了2个最大功率为66 W的TEC冷却片,以对LD模块进行散热,TEC的温度控制精度为 0.01° 。将一个水平偏振方向的透过率 T_p 为99.52%、垂直偏振方向的透过率 T_s 为0.123%的布儒斯特片作为起偏器,调Q晶体为KD*P晶体,输出耦合镜的透过率为75%,总腔长为280 mm。

设置抽运电流的脉宽为200 μs ,重复频率为10 Hz。通过调节抽运能量得到了晶体棒的热焦距测量图,测量结果如图5所示。

由图5可知,当抽运能量较低时,晶体棒的热焦距约为20 m。随着抽运能量的增加,热焦距迅速减小,抽运能量达到2000 mJ时开始趋于稳定,最后热

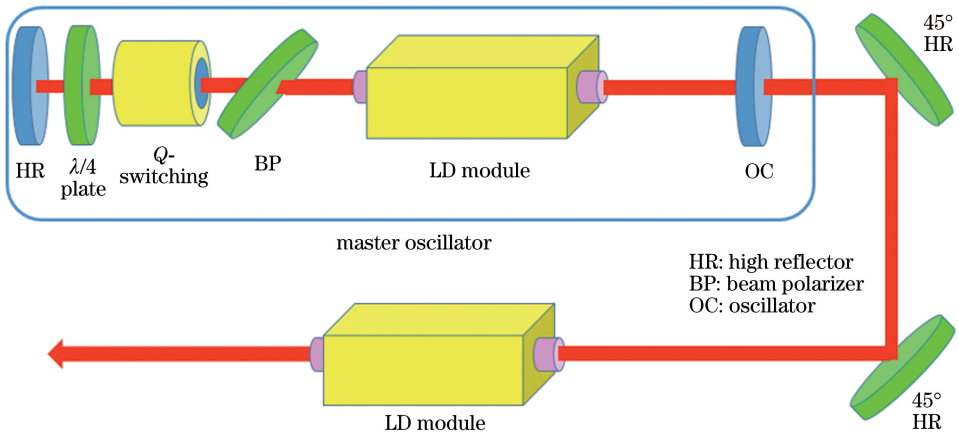


图 1 单程放大实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup schematic of single-pass amplification

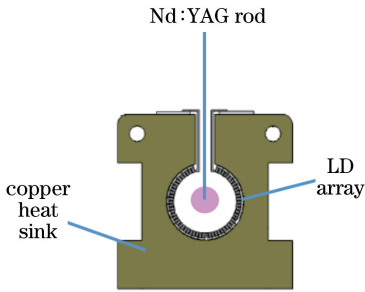


图 2 LD 模块的横截面图

Fig. 2 Cross-section of LD module

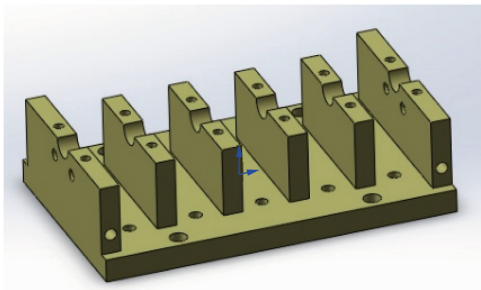


图 3 散热模块结构图

Fig. 3 Structure of thermal module

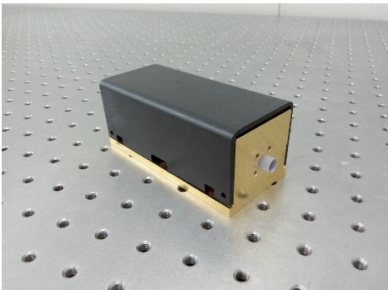


图 4 LD 模块实物图

Fig. 4 Physical map of LD module

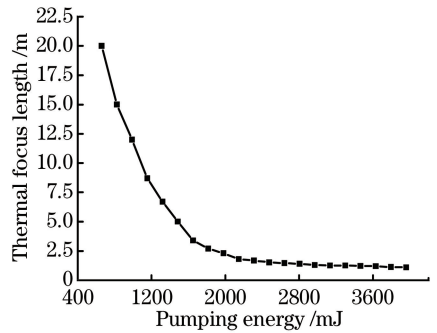


图 5 热焦距随抽运能量的变化

Fig. 5 Variation in thermal focus length with pumping energy

了抽运能量-输出能量曲线和抽运能量-脉宽曲线, 实验结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 当抽运能量从 1320 mJ 增加到 1980 mJ 时, 输出能量从 170 mJ 快速增加至 330 mJ, 激光脉宽从 25 ns 逐渐减小至 10 ns。但是, 随着抽运能量的进一步增加, 输出能量增长的速度开始变慢, 输出曲线在 2640 mJ 时趋近饱和, 激光脉宽稳定在 10 ns 左右。当抽运能量从 1320 mJ 开始增加时, 反转粒子数不断增加, 从而引起了激光输出特性的不断变化。但是, 当抽运能量增加到 1980 mJ 时, 反转粒子数逐渐接近饱和。随着抽运功率的不断增长, 晶体棒的热积累逐渐明显、热效应不断增强, 致使光斑的形状发生改变, 限制了激光的输出。通过一个聚焦镜将输出光束耦合进一个 CCD 相机来检测光束质量, 同时使用一个光电探头来测量脉宽, 测量结果如图 7 所示, 最终在抽运能量为 2640 mJ 的条件下, 获得了能量为 350 mJ、脉宽为 9.7 ns 的激光输出, 激光光束在 x 、 y 两个方向上的光束质量分别为 7.7 和 12.3。

焦距稳定在 1.1 m 左右。设置抽运电流的脉宽为 200 μ s, 重复频率为 10 Hz, 通过调节抽运能量得到

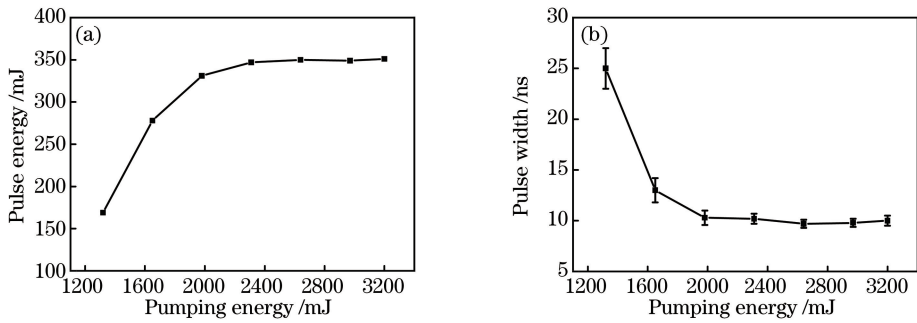


图 6 不同抽运能量下调 Q 激光器振荡级的输出特性。(a)输出能量;(b)脉宽

Fig. 6 Output characteristics of oscillator stage of Q-switched laser under different pumping energy.

(a) Output energy; (b) pulse width

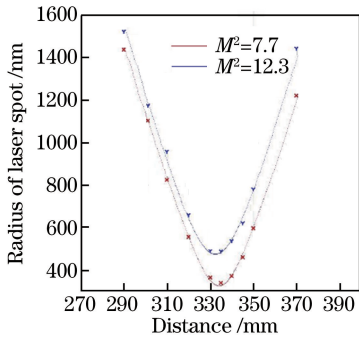


图 7 光束质量测量结果

Fig. 7 Measurement result of beam quality

2.2 放大级

主振荡功率放大是一种有效提高激光器能量输出的方法,为了获得更高能量的输出激光,使用能量为 350 mJ 的调 Q 激光器作为主振荡级进行放大实验,实验装置如图 1 所示。为提高模块稳定性并减小其体积,将晶体棒和 LD 阵列集成为一个放大模块。放大模块的结构与振荡级模块相似,直径为 7.5 mm、长度为 134 mm、掺杂浓度为 $1.1\% \pm 0.001$ 的晶体棒由铜夹具夹持,晶体棒周围是由 48 个峰值功率为 100 W 的巴条组成的 LD 阵列,将 LD 阵列直接焊接在铜热沉上进行散热。整个模块由 5 个相

似的抽运部件组成,并采用交替抽运散热的结构,每个组件都有一个 LD 阵列,将所有 LD 阵列串联在一起并接入外电路。LD 阵列的最大工作电流为 120 A,最大工作脉宽为 250 μ s。放大模块使用了 3 个最大功率为 66 W 的 TEC 冷却片,并使用导热硅脂将整个 LD 模块通过 TEC 冷却片连接在一个铜热沉散热片上。放大级可由振荡级电源提供的同步信号进行抽运。使用 2 个 45°全反镜对光路进行折叠,以使振荡级输出的激光通过放大级模块,放大级模块与振荡级输出镜的距离为 150 mm。将主振荡级得到的 350 mJ 的激光脉冲通过放大级模块后,测得激光脉冲的能量为 333 mJ,能量损耗约为 5%。打开放大级的抽运开关,设置放大的重复频率为 10 Hz,抽运脉宽为 200 μ s,改变抽运能量,得到的抽运能量-能量以及抽运能量-脉宽曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,单程放大后激光能量的变化曲线与振荡级的变化趋势相近。当放大级达到阈值之后,种子光的能量得到放大,能量呈线性快速增加,当抽运能量达到 3168 mJ 后,能量的增加速度减慢,最终在 4224 mJ 时达到饱和。输出激光的脉宽、光

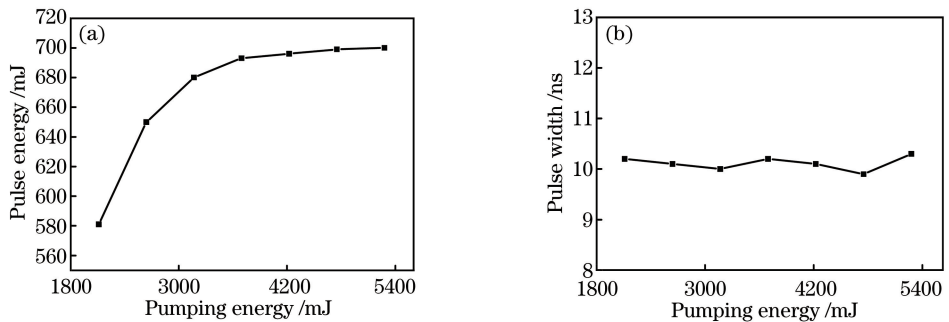


图 8 不同抽运能量下激光经单程放大后的输出特性。(a)输出能量;(b)脉宽

Fig. 8 Output characteristics of single-pass amplified laser under different pumping energy.

(a) Output energy; (b) pulse width

束质量与种子光相似,基本不发生改变。放大的光斑、光束质量测量图分别如图 9 和图 10 所示。最终,在抽运能量为 4752 mJ 时得到了能量为 700 mJ、脉宽为 10 ns 的 1064 nm 激光输出。与焊接触和蓝宝石导管散热等方法相比,实验中所使

用的方法可以获得更高的能量输出。但是,为了获得更高的单脉冲能量,该方法的散热部件与抽运部件的分布比例比前两种方式小,因此热传导的速率受到了一定限制,在高频率条件下会产生较强的热积累,致使整个激光器的输出受到限制。

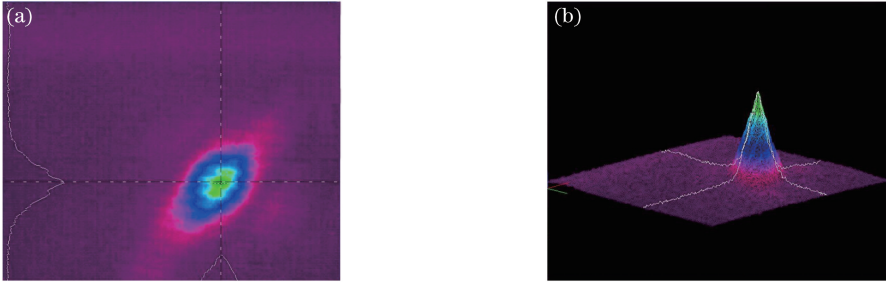


图 9 放大后的光斑。(a)光斑形状;(b)光斑外观

Fig. 9 Amplified beam spot. (a) Beam spot shape; (b) beam spot appearance

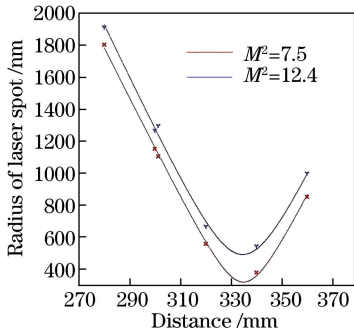


图 10 放大后的光束质量测量结果

Fig. 10 Measurement result of amplified beam quality

3 结 论

报道了一套紧凑型 TEC 冷却、LD 侧面抽运的高能量全固态 Nd:YAG 主振荡功率放大系统。主振荡级使用了一台 LD 侧面抽运的电光调 Q 激光器,使用直径为 7 mm、长度为 100 mm、掺杂浓度为 1.1% 的 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质,将峰值功率为 15 kW 的 LD 阵列作为抽运源,在抽运脉宽为 200 μ s、抽运能量为 2640 mJ 时,主振荡级输出了能量为 350 mJ、重复频率为 10 Hz、脉宽为 10 ns 的激光, x 、 y 两个方向上的光束质量分别为 7.7 和 12.3。放大级将直径为 7.5 mm、长度为 134 mm、掺杂浓度为 1.1% 的 Nd:YAG 晶体棒和峰值功率为 24 kW 的 LD 阵列集成为 LD 模块。在放大级的抽运能量为 4752 mJ 时,得到了能量为 700 mJ、重复频率为 10 Hz、脉宽为 10 ns 的激光输出, x 、 y 两个方向上的光束质量分别为 7.5 和 12.4。受实验散热结构的限制,光束质量没有达到十分理想的状态,但是实验提供了一种实现小型化高能量主振荡放大器的现

实、有效的方法,并且实验也为高能量激光放大的研究提供了一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
- [2] Liu Y, Fang G Z, Ma X Y, *et al.* High power diode pumped solid state lasers [J]. Laser and Infrared, 2002, 32(3): 139-142.
刘媛, 方高瞻, 马骁宇, 等. 大功率二极管泵浦固体激光器[J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 139-142.
- [3] Fujikawa S, Furuta K, Yasui K. 28% electrical-efficiency operation of a diode-side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. Optics Letters, 2001, 26(9): 602-604.
- [4] Ma Y F, He Y, Li X D, *et al.* Continuous-wave and passively Q-switched tape casting YAG/Nd:YAG/YAG ceramic laser [J]. Optical Materials Express, 2016, 6(9): 2966-2974.
- [5] Wang Z P, Liu H, Wang J Y, *et al.* Passively Q-switched dual-wavelength laser output of LD-end-pumped ceramic Nd:YAG laser[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 12076-12081.
- [6] Yang L Y, Li J Q, Zhang J Y, *et al.* Thermal effect of composite crystals solid state lasers pumped by diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(6): 742-746.
杨丽颖, 李嘉强, 张金玉, 等. 半导体激光泵浦复合晶体固体激光器的热效应[J]. 发光学报, 2017, 38(6): 742-746.
- [7] Ma Y F, Li X D, Yu X, *et al.* High-repetition-rate

- and short-pulse-width electro-optical cavity-dumped YVO₄/Nd:GdVO₄ laser[J]. Applied Optics, 2014, 53(14): 3081-3084.
- [8] Liu Q, Yan X P, Fu X, *et al.* High power all-solid-state fourth harmonic generation of 266 nm at the pulse repetition rate of 100 kHz[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(3): 203-206.
- [9] Cheng H P H, Jensen O B, Tidemand-Lichtenberg P, *et al.* Efficient quasi-three-level Nd:YAG laser at 946 nm pumped by a tunable external cavity tapered diode laser[J]. Optics Communications, 2010, 283(23): 4717-4721.
- [10] Zendzian W, Jabczynski J K, Kwiatkowski J. High peak power Nd:YAG laser pumped by 600-W diode laser stack[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(3): 441-444.
- [11] Kofler H, Schwarz E, Wintner E. Experimental development of a monolithic passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser[J]. The European Physical Journal D, 2010, 58(2): 209-218.
- [12] Zheng Y, Lu H, Li Y, *et al.* Broadband and rapid tuning of an all-solid-state single-frequency Nd:YVO₄ laser[J]. Applied Physics B, 2008, 90(3/4): 485-488.
- [13] Shardlow P C, Damzen M J. 20 W single longitudinal mode Nd:YVO₄ retro-reflection ring laser operated as a self-intersecting master oscillator power amplifier[J]. Applied Physics B, 2009, 97(2): 257-262.
- [14] Ottaway D J, Harris L, Veitch P J. Short-pulse actively Q-switched Er:YAG lasers[J]. Optics Express, 2016, 24(14): 15341-15350.
- [15] Gan Q J, Jiang B X, Zhang P D, *et al.* Research progress of high average power solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010003.
甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 等. 高平均功率固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010003.
- [16] Ostermeyer M, Kappe P, Menzel R, *et al.* Diode-pumped Nd:YAG master oscillator power amplifier with high pulse energy, excellent beam quality, and frequency-stabilized master oscillator as a basis for a next-generation lidar system[J]. Applied Optics, 2005, 44(4): 582-590.
- [17] Chen X Y, Jin G Y, Yu Y J, *et al.* Electro-optic Q-switched of double LDA alternate symmetric side-pumped Nd:YAG laser[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3098-3102.
陈薪羽, 金光勇, 于永吉, 等. 双激光二极管阵列侧面交错抽运的电光调 Q Nd:YAG 激光器[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3098-3102.
- [18] Bezyazychnaya T V, Bogdanovich M V, Grigor'ev A V, *et al.* Transversally diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser with improved power and spatial characteristics[J]. Optics Communications, 2013, 308(11): 26-29.
- [19] Coyle D B, Stysley P R, Poullos D, *et al.* High efficiency, 100 mJ per pulse, Nd:YAG oscillator optimized for space-based earth and planetary remote sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 63(6): 13-18.
- [20] Ryabtsev G I, Bogdanovich M V, Grigor'ev A V, *et al.* Powerful all-solid-state multiwave laser for aerosol lidars[J]. Journal of Optical Technology, 2014, 81(10): 571-574.
- [21] Dong J, Liu X S, Si H Y, *et al.* 350 mJ LD side-pumped Q-switched Nd:YAG laser without water cooling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1101005.
董剑, 刘学胜, 司汉英, 等. 350 mJ LD 侧面抽运 Nd:YAG 无水冷调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101005.
- [22] Liu X S, Wang Z Y, Yan X, *et al.* A high-energy good-beam-quality krypton-lamp-pumped Nd:YAG solid-state laser with one pump cavity[J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(2): 521-523.